

Gasentladungslampe

5

Die Erfindung betrifft eine Gasentladungslampe zur Erzeugung extremer Ultraviolett- und/oder weicher Röntgenstrahlung nach dem Oberbegriff des Anspruchs

1. Bevorzugte Anwendungsgebiete sind solche, die extreme Ultraviolett- (EUV-) Strahlung oder weiche Röntgenstrahlung im Wellenlängenbereich von ca. 1-20 nm
10 benötigen, insbesondere um 13 nm, wie zum Beispiel die EUV-Lithographie oder die Röntgenmikroskopie.

- Es ist allgemein bekannt, ein dichtes heißes Plasma als strahlungsemitterndes Medium zur Erzeugung von EUV- und/oder weicher Röntgenstrahlung einzusetzen. Die Gasentladungslampe besteht dabei typischerweise
15 aus einem Elektrodensystem mit Anode und Kathode, welches an einen Strompulsgenerator angeschlossen ist. Der zwischen den Elektroden befindliche Entladungsraum ist gasgefüllt bei Drücken im Bereich von ca. 1 Pa bis 100 Pa. Im Entladungsraum entsteht durch einen gepulsten Strom mit Stromstärken im einstelligen Kiloamperebereich bis max. 100 kA und Pulsdauern im Bereich von 10 ns bis einigen
20 100 ns ein sogenanntes Pinchplasma, welches durch ohmsche Heizung und Kompression durch den Pulsstrom auf Temperaturen von einigen 10 eV und Dichten gebracht wird, bei denen es charakteristische Strahlung des verwendeten Arbeitsgases im interessierenden Spektralbereich emittiert.

- Um das strahlungsemitternde Plasma bereitzustellen ist es erforderlich, Ladungsträger in den Entladungsraum zwischen Anode und Kathode einzubringen oder
25 aber dort zu erzeugen. Hierzu sind geeignete Mittel zur Vorionisierung eines Gases erforderlich, so zum Beispiel ein Oberflächengleitfunkentrigger, ein hochdielektrischer Trigger ein ferroelektrischer Trigger oder ein Glimmentladungstrigger.

- Weiterhin ist bekannt, Ladungsträger über ein Hohlkathodenplasma bereitzustellen, was anhand von Fig. 1 schematisch dargestellt ist. Das
30 Elektrodensystem besteht hier aus Anode 1 und Kathode 2 mit jeweils

gegenüberliegenden Öffnungen 3 bzw. 4 und einem dazwischen befindlichen elektrischen Isolator 5. Im Entladungsraum 6 liegt auf der gestrichelt dargestellten Symmetrieachse 7 ein Plasmakanal 8 vor. Das Plasma emittiert die Strahlung, was durch die Pfeile angedeutet wird. Die Kathode 2 weist ferner einen Hohlraum 9 auf, in dem Ladungsträger wie insbesondere Elektronen durch geeignete Mittel zur Vorionisierung erzeugt werden.

Alternativ zur aktiven Bereitstellung von Startelektronen durch Mittel zur Vorionisierung kann auch ein Betrieb vorgesehen sein, bei dem die Startelektronen im Selbstdurchbruch entstehen. Der Selbstdurchbruch kann hierbei durch eine Trigger-
10 lektrode im Raum 9 gesteuert werden, wodurch die Strahlungspulse zeitlich präzise ausgelöst werden können. Hierbei liegt im Entladungsraum 6 ein Gasdruck von ca. 1 Pa bis 100 Pa vor. Gasdruck und Geometrie der Elektroden sind so gewählt, dass die Zündung des Plasmas auf dem linken Ast der Paschenkurve erfolgt. Die Zündung erfolgt danach im Bereich der langen elektrischen Feldlinien, die im Bereich der
15 Bohrlöcher 3 bzw. 4 auftreten. Zur Bereitstellung des strahlungsemitierenden Plasmas erfolgt zunächst eine Ionisierung des Gases entlang der Feldlinien im Bohrlochbereich. Diese Phase schafft die Bedingungen zur Ausbildung eines Plasmas in der Hohlkathode, weshalb von einem Hohlkathodenplasma gesprochen wird. Dieses Plasma führt dann zu einem niederohmigen Kanal im Elektrodenzwischenraum. Über diesen Kanal wird ein
20 gepulster Strom geschickt, der durch die Entladung elektrisch gespeicherter Energie in einer Kondensatorbank 10 generiert wird. Der Strom führt zur Kompression und Aufheizung des Plasmas, so dass Bedingungen für die effiziente Emission charakteristischer Strahlung des genutzten Entladegases im EUV-Bereich erreicht werden.

25

Nach diesem Funktionsprinzip arbeitende Gasentladungslampen werden zum Beispiel in der WO 99/29145 A1 und der WO 01/01736 A1 beschrieben. Die letztgenannte Druckschrift sieht zudem diverse Maßnahmen vor, um die Effizienz bei der Umwandlung der eingespeisten elektrischen Energie in Strahlungsenergie zu
30 erhöhen, dazu gehört auch die Wahl einer nicht durchgehenden Öffnung konischen Zuschnitts in der Anode. Durch diese geometrische Ausgestaltung der Anodenvertiefung soll die Strahlungsausbeute erhöht werden.

Die WO 02/07484 A2 offenbart eine Gasentladungslampe, bei der auf einer Symmetrieachse ein Pinchplasma geschaffen wird, welches die Strahlung im relevanten Spektralbereich emittiert. Die Druckschrift lehrt, in einem Außenbereich
5 mittels einer gepulsten Gleitentladung eine Vorionisierung vorzunehmen, wobei die entstandenen Ladungsträger über eine axiale Apertur in einer der Elektroden in den Entladungsbereich gelangen sollen. Hierbei ist vorgesehen, dass der Vorionisierungsbereich nicht mit der Achse des Pinchplasmaakanals optisch
10 kommuniziert.

Der Erfindung liegt das technische Problem zugrunde eine Gasentladungslampe mit einem im EUV- und/oder weichen Röntgenwellenlängenbereich emittierenden Plasma bereitzustellen, die eine verbesserte Stabilität der Strahlungsemission aufweist.

15 Die Lösung dieses technischen Problems erfolgt durch die Merkmale des unabhängigen Anspruchs 1. Vorteilhafte Weiterbildungen werden durch die abhängigen Ansprüche angegeben.

Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass das oben genannte technische Problem durch die Bereitstellung einer Gasentladungslampe gelöst wird, bei der sich die
20 durchgehende Elektrodenöffnung in Richtung des Außenbereichs verjüngt. Mit anderen Worten soll der Durchmesser der Elektrodenöffnung auf der dem Entladungsraum zugewandten Seite größer sein als auf der dem Entladungsraum abgewandten Seite.

Als Außenbereich ist derjenige Raumbereich zu verstehen, in welchem Ladungsträger erzeugbar sind, welche über die durchgehende Öffnung in den
25 Entladungsraum transportierbar sind.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass eine Steigerung der Stabilität bei der Strahlungsemission, d. h. eine verbesserte Konstanz bei der Emission von Puls zu Puls, dadurch erreicht wird, dass die Vorgänge im Gasentladungsraum und im Außenbereich weitestgehend entkoppelt werden. Die Vorionisierungsvorgänge im
30 Außenbereich mit der Erzeugung von Ladungsträgern beeinflussen nämlich den Entladungsvorgang im Zwischenraum und führen zu einer Destabilisierung der Strahlungsemission.

Es wurde gefunden, dass der Nachteil eines Entladungsaufbaus im Entladungsraum zwischen Anode und Kathode vor Erreichen der angestrebten Haltespannung, d. h. der so genannte Selbstdurchbruch, dadurch gemindert werden kann, dass weniger Ladungsträger vom Außenbereich, zum Beispiel von der Hohlkathode, in den Elektrodenzwischenraum übertragen werden. Hierzu dient die durchgehende Öffnung in der Elektrode, sei es die Anode oder die Kathode, die sich in Richtung des Außenbereichs verjüngt.

Die auf diese Weise verbesserte Spannungsfestigkeit des Elektrodensystems erlaubt ferner eine Erhöhung der maximalen Wiederholfrequenz bzw. der maximalen Wiederholrate.

Die erfindungsgemäßen Gasentladungslampe kann entweder im Selbstdurchbruchbetrieb genutzt werden, oder es können alternativ zusätzliche Mittel zur Vorionisierung vorgesehen sein. Durch eine derartige Zündvorrichtung kann erreicht werden, dass die Strahlungsimpulse zeitlich präzise ausgelöst werden, falls es die Anwendung erfordert.

Die sich verjüngende Kathodenöffnung kann geometrisch unterschiedlich beschaffen sein. Dies wird in den in den dargestellten bevorzugten Ausführungsbeispielen Fig. 2 bis 7 gezeigt, die eine Vergrößerung des in Fig. 1 dargestellten gestrichelten Bereichs wiedergeben. Der vergrößert dargestellte Bereich ist in den Fig. 2 bis 7 gegenüber Fig. 1 um 90° im Gegenuhrzeigersinn gedreht.

Möglich sind kontinuierliche oder stufenförmige Übergänge in der Öffnung gemäß Fig. 2 und 4 bis 7, und auch die Bereitstellung einer Öffnung mit einer Einschnürung, vgl. Fig. 3, d. h. einer Verkleinerung des Durchmessers, welcher eine Vergrößerung des Durchmessers folgt.

Weiterhin zeigt eine sich in Richtung des Außenbereichs verjüngende Elektrodenöffnung Vorteile bei der Erosion der Elektrodenoberfläche. Bei der Erzeugung eines Pinchplasmas werden nämlich Pulsenergien von typischerweise einigen Joule bis mehreren 10 J umgesetzt. Ein wesentlicher Anteil dieser Energie wird im Pinchplasma konzentriert, was zu einer thermischen Belastung der Elektroden führt. Die thermische Belastung entsteht hierbei durch die Emission von Strahlung und von heißen Teilchen, wie zum Beispiel Ionen. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts sei angemerkt, dass der Abstand der Anode von der Kathode typischerweise nur einige

Millimeter beträgt, und der Durchmesser der Elektrodenöffnung auf der Entladungsseite typischerweise zwischen 8 mm und 20 mm.

Vorzugsweise ist die Kathode als Hohlkathode ausgeführt und weist die durchgehende, sich verjüngende Öffnung auf. In diesem Fall ist der Hohlraum der Hohlkathode mit dem Entladungsraum gaszuleitend verbunden. Dies ermöglicht die Zündung eines Hohlkathodenplasmas.

Zur Minderung der thermischen Belastung wäre ein möglichst großer Abstand der Elektrodenoberfläche zum Pinchplasma vorteilhaft. Typische Durchmesser für die Öffnung der beiden Elektroden liegen im Bereich einiger Millimeter bis zu einigen 10 Millimetern. Würden demgegenüber größere Öffnungen gewählt, so könnte zunehmend kein Pinchplasma mehr erzeugt werden, welches im angestrebten Spektralbereich der EUV- und/oder weichen Röntgenstrahlung emittiert, denn mit zunehmender Vergrößerung des Durchmessers wird die erreichbare Plasmatemperatur kleiner. Die Anodenöffnung sollte zudem auch deshalb möglichst groß gewählt werden, damit die aus der Anodenöffnung ausgekoppelte Strahlung auch aus großen Beobachtungswinkeln zum Pinchplasma optisch möglichst gut zugänglich ist.

Es hat sich experimentell als zweckmäßig erwiesen, den Durchmesser der Kathodenöffnung so zu wählen, dass er sich bis zum Außenbereich um etwa ein Faktor 2 verjüngt.

Es kann ferner vorgesehen sein, dass die Kathode im Öffnungsbereich aus einem anderen Material gefertigt ist als in den anderen Bereichen der Kathode. So kann der Öffnungsbereich zum Beispiel aus einem niedererosiven Material wie Wolfram, Molybdän oder anderen niedererosiven Legierungen bestehen, um dadurch einen geringeren Abbrand bzw. eine geringe Erosion zu realisieren. Die restlichen Bereiche der Kathode können dann aus gut wärmeleitfähigem Material wie beispielsweise Kupfer bestehen.

In einem weiteren Aspekt der Erfindung ist vorgesehen, dass auf der dem Entladungsraum zugewandten Seite die Anodenöffnung einen kleineren Durchmesser aufweist als die Kathodenöffnung. Bei einer auf dem linken Ast der Paschenkurve betriebenen Gasentladung bedingt dies nämlich längere elektrische Feldlinien dadurch, dass diese Feldlinien nun in die Öffnung hineinreichen, zum Beispiel bis zur Stufe in der Kathodenöffnung gemäß Fig. 4. Dies erlaubt eine Senkung des Gasdrucks im

Entladungsraum, was wiederum eine Steigerung der Wiederholfrequenz der Gasentladungslampe ermöglicht. Die Steigerung der Wiederholfrequenz führt zu einem höheren Maß an auskoppelbarer Strahlungsenergie.

In einem weiteren Aspekt der Erfindung erlaubt der Einsatz einer sich
5 verjüngenden Kathodenöffnung eine einfachere Betriebsweise der Gasentladungslampe. Bei einer sich verjüngenden Kathodenöffnung hat der Fachmann insgesamt zwei Durchmesser auszuwählen, nämlich den Durchmesser der Kathodenöffnung auf der dem Entladungsraum zugewandten Seite, und zusätzlich den Durchmesser auf der dem Außenraum zugewandten Seite der Kathodenöffnung. Je nach Wahl der beiden
10 Durchmesser gewinnt der Fachmann beim Betrieb der Anlage einen weiteren Freiheitsgrad, durch den es ihm leichter fällt, geeignete Betriebsparameter zu wählen.

Je nach den Erfordernissen der jeweiligen Applikation kann es nämlich durchaus vorkommen, dass ein höherer Betriebsdruck erforderlich ist. Bei einer Kathodenöffnung, welche sich vom Entladungsraum beginnend in Richtung des
15 Außenraumes verkleinert, kommt es in vielen Fällen zu einem höheren Betriebsdruck, so dass der Fachmann in diesem Fall die Maximierung der EUV-Ausbeute bei vorgegebener Pulsenergie besser vornehmen kann.

Bei anderen experimentellen Situationen kann jedoch genau das Gegenteil erforderlich sein, d.h. es kann erforderlich sein den Betriebsdruck zu senken.
20 Zur Erläuterung sei angeführt, dass die maximal erreichbare Wiederholrate typischerweise mit der Zeit skaliert, mit der die Ladungsträger des Plasmas rekombinieren. In Experimenten hat sich gezeigt, dass die Vergrößerung des Kathodendurchmessers die Wahl eines niedrigeren Betriebsdrucks erlaubt, und dies ermöglicht eine höhere Wiederholrate. Insgesamt wird somit je nach
25 anwendungsspezifischen Erfordernissen eine leichtere Einstellung der Betriebsparameter möglich sein.

CLAIMS:

1. Gasentladungslampe für den Wellenlängenbereich extremer Ultraviolettstrahlung und/oder weicher Röntgenstrahlung, mit mindestens zwei Elektroden (1, 2) zur Erzeugung eines strahlungsemitternden Plasmas (8) im dazwischen befindlichen Entladungsraum (6), bei der eine der Elektroden (1, 2) eine durchgehende Öffnung (4) zu einem angrenzenden Außenbereich (9) aufweist, wobei
5 im Außenbereich (9) Ladungsträger erzeugbar sind welche über die Öffnung (4) in den Entladungsraum (6) transportierbar sind, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Elektrodenöffnung (4) in Richtung des Außenbereichs (9) verjüngt.
- 10 2. Gasentladungslampe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Mittel zur Vorionisierung von Gas im Außenbereich (9) vorgesehen sind.
- 15 3. Gasentladungslampe nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden im Öffnungsbereich aus einem Material gefertigt ist, das im Vergleich zum restlichen Elektrodenmaterial niedererosiver ist.
- 20 4. Gasentladungslampe nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass eine Elektrodenöffnung mit kontinuierlichem oder stufenförmigem Übergang vorgesehen ist.

5. Gasentladungslampe nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass innerhalb der Elektrodenöffnung eine Einschnürung vorliegt.

- 5 6. Gasentladungslampe nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Kathode mit der sich verjüngenden durchgehenden Öffnung ausgestattet ist.